

# 天然示踪法在贮灰场土坝渗漏探测中的应用

王新建, 陈建生, 陈 亮

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要** 简述天然示踪法的概念、地下水温度场和电导场分布特征、热源法原理及电导渗漏测试原理. 分析某贮灰场土坝垂向和水平温度分布特征、电导水平分布特征, 并利用渗漏探测虚拟热源法模型, 计算出该土坝的集中渗漏通道的空间位置、展布特点、范围大小和渗漏强度, 为堤坝渗漏治理提供科学依据.

**关键词** 天然示踪法; 土坝; 渗漏; 温度场; 电导; 虚拟热源法

**中图分类号** :TV698.1+2      **文献标识码** :B      **文章编号** :1006-764X(2005)06-0067-05

**Application of natural tracer method to leakage detection for ash field earth dam**//WANG Xin-jian, CHEN Jian-sheng, CHEN Liang *Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China*

**Abstract** : A brief introduction was given to the concept of natural tracer method, the characteristics of temperature and conductance distribution in groundwater, and the theory of heat-source method and conductance method for leakage detection. The characteristics of temperature distribution in vertical and horizontal directions and the conductance distribution in horizontal direction in an earth dam were analyzed, and the locations, distribution characteristics, ranges, and leakage rate of main leakage passages of the dam were calculated by use of the virtual heat-source method presented in this paper. The result of study provides a scientific basis for dam leakage control.

**Key words** natural tracer method; earth dam; leakage of earth dam; temperature field; conductance; virtual heat-source method

天然示踪法是区别于人工示踪法而提出的, 通过研究地下水温度、电导、磁场、天然同位素等自然场特征, 分析计算堤坝中的渗漏通道位置及特性. 天然示踪法中的示踪剂来源于天然形成的物理场, 因而具有成本低、效率高、无污染等优点. 本文运用虚拟热源法理论, 建立虚拟热源法渗漏探测模型, 结合地层天然温度场和地下水电导场分布特征探测土坝中的渗漏通道特性.

## 1 天然示踪原理

渗漏堤坝物理特征场是渗漏作用和正常渗流作用的综合结果, 是两种不同运动方式的地下水所产生生物性场的叠加. 由于堤坝渗漏水 and 正常堤坝渗流水在岩土体中的运移特点、水-土作用方式和作用时间不同, 其成分和物理化学特征及其形成的物理场都有所不同. 通过渗漏源、堤坝渗流背景场、渗漏场和漏水点物性特征分析, 可以确定渗漏通道位置及其他特征.

### 1.1 土层中温度场特征

地层表面温度与环境温度有关, 受地表附近大气温度影响和太阳照射影响, 因此其温度是随季节周期变化的. 实验表明, 地表面温度对地层的影响深度一般为 3~5 m, 5 m 以下地层受地表温度的影响很小. 深部地层温度变化将随着深度增加而上升, 是因为地球的深部为熔融状, 温度可达到数千摄氏度. 随着地层深度增加, 温度也随之增加, 一般深度每增加 100 m, 温度增加 3℃. 地壳中存在常温层, 该层的温度不随季节的变化而变化, 只要渗漏部位在常温层以下就可以不考虑气温的影响; 在常温层以下温度随深度的增加而上升, 地壳内部某深度以恒定热流率放热, 在均匀常物性地层中形成的深度上温度梯度是常数.

### 1.2 温度场示踪原理

堤坝在没有集中渗漏的状态下, 孔隙水只发生渗流, 流动速度缓慢而稳定, 土水间有充足的时间和充分的接触空间进行热交换. 因而其温度和土体(土体受地温影响)一致, 此时形成的温度场称为背景温

度场,所以渗流补给源水温往往和背景场中的水温有着截然不同的温度.当有渗漏发生时,渗漏通道中的水流速很快,和渗流水相比更接近渗漏源的水温.所以即使渗漏和渗流同源,渗流水温和渗流水温往往相差很大.温度差的存在必然产生热传导.由于渗漏通道中的水流速度远远大于背景渗流场中水的渗流速度,渗流水和土体间热量来不及充分交换,仅仅在通道边缘与周围土体进行部分热量交换,然后热量交换依次向周围推进.背景温度场就会在通道和周围改变很大,越远离渗漏通道温度改变越小,就形成了具有一定特征的温度场.

集中渗漏通道可以被看作为热源,可以是高温热源也可以是低温热源,视与周围介质温度差而定.

### 1.3 电导测漏原理

堤坝孔隙水主要是库水通过缓慢渗流作用形成的,其次是降水通过垂向渗透缓慢渗入到含水层中,在长期运移过程中,堤坝孔隙水与地层中的矿物质发生溶解、物理化学反应、蒸发浓缩等作用,水中的矿化度不断提高,从而使地下水具有较高的电导值.电导值的大小与地下水在地层中的停留时间有关,停留时间越长,其电导值也越高;另外电导值大小还与地下水流经地层的岩石成分与污染源影响有关<sup>[1]</sup>.

通过测定天然流场中地表水与地下水电导分布,可以定性分析地层中不同位置地下水电导率变化规律,地下水补给源、赋存形式和运动方式不同,形成的电导率分布特征也不同.水的电导值可以作为一种天然示踪剂,进行地层渗流通道测定,从而确定出地表水对地下水的补给关系.该法不但有助于查清地下水的渗流情况,而且还可以确定地下水渗漏分布及变化情况.

目前用电导场作渗漏示踪研究仍然停留在定性分析阶段<sup>2,3]</sup>.

## 2 土坝渗漏中的虚拟热源法模型

渗漏通道和含水地层所处的环境及传热相当复杂,要进行模型研究,必须对实际问题去伪存真,分清主次,科学简化.笔者在此作如下假设:

a. 渗漏通道以外的土体温度变化完全由热传导引起.

b. 忽略渗漏通道和地层间对流换热作用和热辐射作用.

c. 假设在地层中存在一个虚拟的线热源,把真实渗漏通道近似为一个半径为  $R$  的圆柱<sup>[4-6]</sup>,在圆柱中心位置存在一个虚拟线热源,所有的热量都是通过这个虚拟的线热源释放出来的.

设柱长度为  $L$ ,虚拟线热源温度为  $T_1 - T_1'$ ,如图1所示,虚拟线热源的效果正好使得圆柱边界上的温度等于渗漏圆柱真实的温度  $T_2 - T_2'$ ,对于圆柱以外的地层,虚拟线热源的热传导效果和真实的渗漏圆柱的热传导效果应该是相同的,于是就可以用虚拟的线热源来代替真实的柱状渗漏带引起的地温异常.

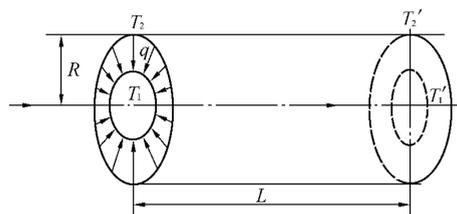


图1 线热源影响区域示意图

线热源在地层中引起的过剩温度为<sup>[7]</sup>

$$\alpha(r, \tau) = \frac{1}{4\pi a} \int_0^\tau \frac{\varphi(\tau')}{(\tau - \tau')} \exp\left[-\frac{r^2}{4a(\tau - \tau')}\right] d\tau' \quad (1)$$

式中  $\alpha(r, \tau)$  为地层中线热源引起的过剩温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $a$  为地层导温系数,  $\text{m}^2/\text{h}$ ;  $r$  为点  $(x, y)$  与线热源之间的距离,  $\text{m}$ ,  $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$ ,  $x$  和  $y$  为任意点坐标;  $\varphi(\tau')$  为持续线热源强度,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ ,  $\varphi(\tau') = \frac{q(\tau')}{\rho c}$ , 其中  $\rho$  为水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $c$  为水的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,  $\tau$  为时间,  $\text{s}$ .

若线热源功率  $q(\tau) = q_1 = \text{常数}$ , 则  $\varphi(\tau) = \varphi = \text{常数}$ , 引进新变量  $\eta = R^2 [4a(\tau - \tau')]$ , 式(1)变为

$$\alpha(R, \tau) = -\frac{q_1}{4\pi\lambda} E(x) \Big|_{x=-\frac{R^2}{4\pi\lambda}} = -\frac{q_1}{4\pi\lambda} E_i\left(-\frac{R^2}{4\pi\lambda}\right) \quad (2)$$

式中, 指数积分

$$E(x) = -E(-x) = \int_x^\infty \frac{1}{\eta} \exp(-\eta) d\eta = \int_1^\infty \frac{1}{\xi} \exp(-x\xi) d\xi$$

对于大的  $\tau$  值, 式(2)可近似为<sup>[8]</sup>

$$\alpha(R, \tau) = \frac{q_1}{2\pi\lambda} \left( \ln \frac{1}{R} + \frac{1}{2} \ln(4a\tau) - \frac{\gamma}{2} \right)$$

式中:  $\gamma = 0.5772\dots$  称为欧拉常数. 因而常功率持续低温线热源在无限大物体中造成的稳态温度分布服从<sup>[9,10]</sup>

$$\alpha(r) = \frac{q_1}{2\pi\lambda} \ln \frac{1}{r} \quad (3)$$

式中:  $q_1$  为维持地层温度不变化的虚拟线热源的发热率;  $\lambda$  为地层导热系数, 可根据式  $\lambda =$

$(11.33\ln\omega - 3.4)10^{0.649\rho_d-2}$  计算,  $\omega$  为天然含水量;  $\rho_d$  为土体干密度<sup>[11]</sup>;  $r$  为测点到热源中心的距离. 式(3)给出了过剩温度、热源距离和放热量间的关系式, 令没有受到热源影响的土体温度为  $t_0$ , 受到热源影响后的土体温度为  $T$ , 则过剩温度已知. 式(3)中两个未知量分别为热源放热率和距离, 所以通过探测井的温度数据联立两个方程即可求解. 所求距离就是渗漏通道中心位置. 当数据较多时, 可采用最小二乘法回归求解.

渗流示踪的虚拟热源法求解原理见图 2. 理论线热源的渗漏通道是一条线, 实际渗漏通道有一定大小. 渗漏通道中的水流换热和土体导热相比很快, 根据本文第 2 节假设 c, 渗漏通道中的水温在横截面上是均匀的, 该虚拟线热源的效果正好使得渗漏通道边界上的温度与渗漏引起的温度相等, 渗漏带以外的温度完全是由于热传导引起的, 而水流换热对地层带来的温度影响可以忽略<sup>[11]</sup>, 于是就可以利用已经测定到的地层温度分布值来拟合一条满足式(3)的曲线. 虚拟温度曲线是理论线热源在渗漏通道中的部分, 实际不存在. 在上述假设下实际渗漏通道水温在理论曲线上所对应的距离就是渗漏通道的半径. 本文依此来计算渗漏通道大小.

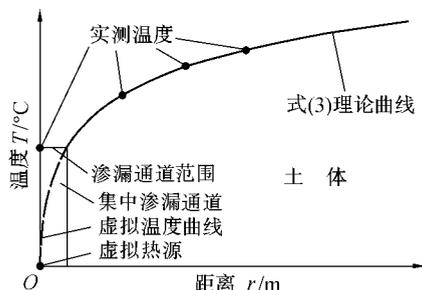


图 2 虚拟线热源  $r \sim T$  理论曲线与地层温度实测值

### 3 天然示踪法测试与分析实例

#### 3.1 工程概况

某灰场 4 号坝体是分级分期建成的, 在每级子坝形成的库区中放满灰渣后, 再在上面修筑子坝. 在填土以前, 在灰渣表面干砌 0.5 ~ 0.6 m 厚的块石后, 回填粉土、黏土. 坝体填土为附近的残积土, 以粉土为主, 灰黄色、黄色. 灰渣为灰色、灰黑色, 为粉土质砂. 从整体上看, 坝体填土是由经过碾压的粉土和自然堆积后经排水固结的灰渣组成. 为加速作为坝体部分的灰渣排水固结, 在第一级子坝坝基(初期坝的坝顶处), 即 70 ~ 71 m 高程处, 距库区第一级子坝坝踵 18.0 m 处, 沿坝轴线纵向布置了水平排渗管——直径 250 mm 的塑料管. 每隔 50 m 设集渗井一个, 再用直径 400 mm 的混凝土管把集渗井的积水排

到后坡坝面排水沟. 经二级子坝加高后, 目前 4 号坝坝顶高程为 83 m, 坝高为 35.6 m.

利用水力输送灰渣到该灰场深槽堆放后, 采用原有的坝体过滤固结排水系统排除积水. 40 d 后发现 4 号坝体后坡混凝土排水管正上方 71 m 高程处漏水, 漏水孔直径 30 cm, 并出现塌方、沉陷, 漏水呈黄色, 带出大量黄泥, 后漏水孔直径不断扩大, 达 70 cm × 50 cm (宽 × 高), 深达 2.0 m.

为查明渗漏的原因及确定渗漏通道的位置, 以漏水点垂直坝轴线的剖面为中心布置了 2 排探测孔. 第一排位于一级平台以下 1.0 m 即 76 m 高程处, 第二排位于坝顶以下 2.0 m 处即 81 m 高程处. 第一排探测孔 3 个, 孔距 15 m, 第二排 5 个, 孔距 20 m 和 30 m, 两排共 8 个探测孔.

#### 3.2 温度测试分析结果

多次温度测试结果相似, 这里仅取较为典型的一次进行分析. 漏水点、排水点和尾水的测试时间相接近, 测试时间接近中午. 漏水点温度为 22.3 °C; 库水和尾水温度分别为 28.7 °C 和 27.4 °C; 上、下层排水点温度分别为 29.2 °C 和 28.2 °C. 所以有:  $T_L$  (22.3 °C) <  $T_S$  (≈ 24 °C) <  $T_W$  (27.4 °C) <  $T_P$  (28.2 °C) <  $T_K$  (28.7 °C),  $T_L, T_S, T_W, T_P, T_K$  分别为漏水点水温、渗流水温、尾水水温、排水管水温和库水水温.

由以上数据可知, 漏水点水温远远低于其他各点水温, 这说明坝体中集中渗漏通道是低温, 在其周围必然形成低温异常区. 测试时间接近中午, 库水水温受太阳辐射影响温度虽然很高, 但土体渗流速度缓慢, 其温度受水库温度的影响会明显滞后, 保持了库水没有受辐射影响的较低温度, 水库水温远不能代表坝体渗流水温. 排水管中的水流速度快, 因而比较接近库水温度, 低于库水水温是因为排水管经过了低温渗流区——坝体. 而集中渗漏通道的水流速度虽然大于渗流流速, 但两者保持了同等级别, 都远远小于排水管中水的流速, 与渗流相似, 渗流水温较低也是滞后作用使它维持了水库升温以前的低温(虽然渗漏和渗流都有滞后现象, 由于渗流受地温影响相对大, 其温度要高于渗流水温). 尾水是库水通过排水管排出的水、渗流水和渗流水的混合物, 而它们的温度是依次下降的, 排水管的排水量要远大于渗漏和渗流量, 所以混合水温(尾水)必然介于三者温度范围内, 并更接近占混合水水量比例最大来源的水温度. 因而, 尾水水温低于排水点水温和库水水温, 而高于渗漏和渗流水温.

分析综合钻孔水温测试结果(图 3、图 4)有如下规律:

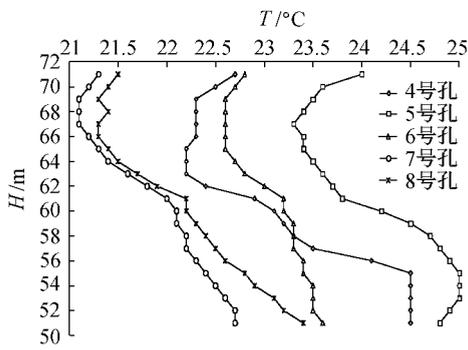


图3 上排4~8号钻孔温度变化曲线

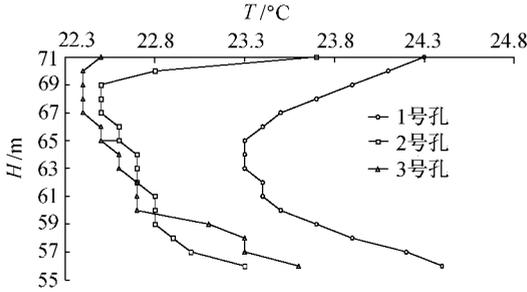


图4 下排1~3号钻孔温度变化曲线

a. 各钻孔均有一段温度异常段,大致位于高程69~61m范围,异常温度最低的是7号和8号孔曲线.从71m到低温段都有一个明显温度下降的过程,最明显的是2号曲线,降幅达 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,这是由于表层受环境高温影响的结果.堤坝渗漏区在深度上应当位于这个低温带范围内,各曲线温度异常的深度基本相同,说明了渗漏主要是水平的,垂向流微小.

b. 由于受微弱垂向流的影响不同,正常温度和异常温度的过渡有缓慢渐变型和陡变型.同位素仅仅测试了3号和6~8号孔的垂向流,8号孔在63m处垂向流最大,而从线型上看6~8号孔是同一类型曲线(钻孔和曲线取同样的编号),上排孔有可能没有揭示完整温度异常曲线,所以很难做垂向流的大小对比.

c. 不同曲线的低温段整体温度高低有明显差别,是由于渗漏程度不同所致(离线热源的距离不同),这对于区分渗漏和渗流极其重要.

d. 个别曲线温度变化具有多台阶特征,是由土体介质物性非均匀性造成的不同水力特性所致.

从钻孔最大异常温度和漏水点温度数据表(表1)中可知,钻孔温度异常位置基本相当,这种一致的规律准确标示了渗漏层位.和4号、5号和6号孔异常温度相比,7号、8号孔的异常温度更低一些,说明地下水主要是经过7号、8号孔渗漏补给到漏水点.一方面,渗漏通道向下游方向埋深越来越浅,受环境高温影响,尤其是漏水点受影响更大;另一方面,渗漏水在通道内流动过程中,不断与高温土体发生了热交换,温度不断上升,因而水流到达漏水点时温度高于渗漏通道中的水温.

综合图3、图4和表1作高程67m处的温度场分布平面图(图5),由图5及虚拟热源法原理可以得出:

表1 钻孔及漏水点最大异常温度

位置	孔号	低温异常值/ $^{\circ}\text{C}$	异常位置高程/m
下排钻孔	1	22.3	65
	2	23.5	67
	3	22.4	67
	4	22.2	64
上排钻孔	5	23.3	67
	6	22.6	67
	7	21.1	67
	8	21.3	67
漏水点		22.3	71

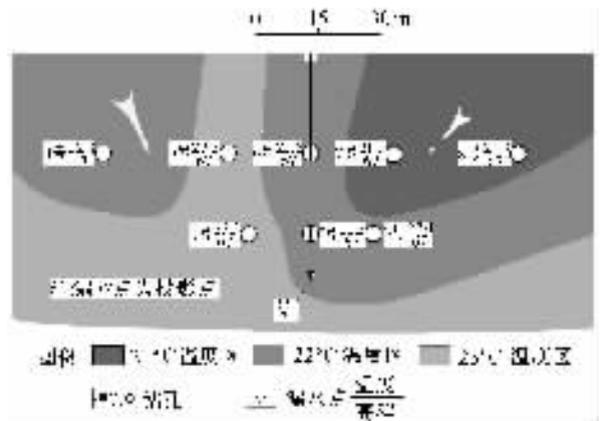


图5 高程67m处温度场分布

a. 在6~8号孔一侧的温度梯度较大,因而必然对应着较大流速,说明渗漏补给源主要是经过6~8号孔一侧.最低温度区( $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下)包含7号、8号孔,面积大,说明该区渗漏较其他更直接来源于渗漏补给源,是主要渗漏途径.

b. 4号孔的温度也存在异常,但是异常温度较6~8号孔异常温度稍高,范围不大,与渗漏的相关性较小(也可能是较大的渗流).而由各孔温度异常程度可以看出,该区的渗漏流量小,速度慢,渗漏水受土体温度影响大,温度必然顺流径不断升高,因而会对主渗透区形成的温度场产生影响.这种影响表现在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线在1号和2号孔之间出现弯曲变形,致使 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线和 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线出现不协调现象,所以4号方向对漏水点有渗漏补充作用,可以估计在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线变形附近是此条渗透路径经过的地方.

c. 由于次要渗漏通道补充水量明显小于主渗漏的漏水量,对漏水点水温影响不大.如果仅仅在这种情况下忽略渗漏路径对温度影响的差异性,并且已知两渗漏途径中的水温,可以估算出两者对漏水点补给的相对比例.

d. 渗漏通道位置确定.先根据温度场和线热源

模型(图2),定性分析主渗漏途径的大致位置:渗漏是从钻孔区域上游偏右斜向流经7号和8号孔之间(箭头所示),向下游流经2号孔和3号孔之间,最后到达漏水点。根据集中渗流通道形成和分布的一般特征,通道在下游较上游更集中。顺渗流通道向下游,土体和集中渗漏的水不断发生热交换,温度不断上升。但只要钻孔没有打在渗漏通道上,2号孔、3号孔的异常温度仍会高于漏水点水温。

求解渗漏通道确切位置及其他参数: $\lambda$ 取 $1.41 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ,不受虚拟热源影响的温度 $t_0 = 23.4^\circ\text{C}$ 。由温度分布曲线的对称性,把7号、8号孔的最大异常温度 $T$ 、不受热源影响的地层温度 $t_0$ 及距离 $x$ 分别代入式(3)联立方程组,求出 $x = 16.84 \text{ m}$  ( $q_1 = -7.21 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s})$ )。因为这里是低温热源,故位于7号孔和8号孔之间的渗漏通道在距离8号孔 $16.84 \text{ m}$ 处,此处线热源放热率为 $-7.21 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。在下排钻孔一线取不受虚拟热源影响的温度为 $23.6^\circ\text{C}$ 。同理利用2号、3号孔数据,求出位于2号和3号孔之间的渗漏路径在距离2号孔 $8.15 \text{ m}$ 处,此处线热源放热率 $q_1 = -5.06 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

把漏水点温度( $22.3^\circ\text{C}$ )通过温度平面图温度梯度(通过漏水点和7号孔温度计算得到,为 $0.035^\circ\text{C}/\text{m}$ )换算得到7号和8号孔及2号和3号孔之间渗漏通道水温( $20.79^\circ\text{C}$ 、 $21.86^\circ\text{C}$ )。将已知数据代入由式(3)推导的公式: $r = e^{-\frac{2\pi\lambda\theta}{q_1}}$ ,得到7号和8号孔及2号和3号孔之间的渗漏通道等效半径分别为 $4.1 \text{ cm}$ 及 $4.8 \text{ cm}$ 。

### 3.3 电导测试分析

电导测试仪器本身已做温度校正。电导平面图(图6)显示了良好的电导异常分区,图左侧即4号与5号孔之间,受渗漏影响相对小,只有其右侧受渗漏通道影响,电导值有规律地自左向右均匀降低;5号孔及其右侧区域明显受渗漏通道低电导影响,其值普遍较低,为低电导区,并形成了漏斗形低电导连通带,该带包含了2号、5号、7号、8号孔。6号孔处在两个渗漏通道之间,其电导值( $503 \mu\text{s}/\text{cm}$ )比两侧渗漏通道上的电导值高,但却远小于4号孔的电导值( $568 \mu\text{s}/\text{cm}$ ),说明已经受两侧渗漏通道影响。电导图充分表明了存在两个渗漏通道及其相互关系,与温度示踪法计算分析的渗漏通道相协调。另外在低电导区,自上游向下电导值有逐渐增大的趋势,这说明了地下水电导与在地层中滞留时间有关,因而可以得出和温度平面图相一致的结论:渗漏分为两条路径,第一个渗漏通道经过7号、8号孔,第二个渗漏通道经过5号孔附近,两条路径在2号孔附近汇合,最终到达漏水点。

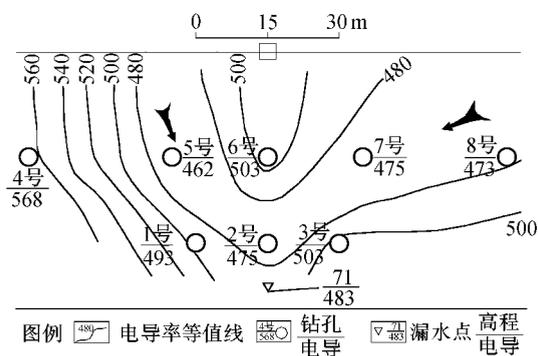


图6 67m高程处地下水电导率等值线

## 4 渗透破坏机理及防渗措施

本文灰坝内水力冲填的粉煤灰为粉土质砂,以细砂、粉粒为主,重新启用放灰后,灰坝内的粉煤灰体饱和,干密度低,接近或低于 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,孔隙比大,超过 $1.0$ ,渗透性强,渗透系数在 $10^{-2} \text{ cm}/\text{s}$ 量级(填土在 $7.49 \times 10^{-4} \sim 2.01 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s}$ 之间),颗粒比重低、粉粒含量高( $67.7\% \sim 68.4\%$ ),孔隙率大的材料,管涌、流土渗透破坏和液化是粉煤灰的主要工程地质问题。由于这些特性,此坝中的渗透路径往往是先经过粉煤灰再经过填土。粉煤灰渗透系数大,水通过该层水头降低不大,堤坝填土就承受很大水头压力,又由于灰坝填土宽度和土性是不均匀的,特别是填土较窄的地方(高程为 $70 \sim 71 \text{ m}$ 处最窄,填土宽不到 $5 \text{ m}$ 附近尚有内埋管道),一旦超过填土的临界水力坡度,在强大的渗透力作用下土体孔隙内小颗粒逐渐被带走,直至土体局部破坏形成内部连通的管道——渗漏通道。

据调查,该灰场槽形库容的水位约为 $82 \text{ m}$ ,水头差达 $12 \text{ m}$ 时,堤坝 $71 \sim 75 \text{ m}$ 高程处饱和土体被击穿而产生流土破坏。

防渗修复加固措施采用技术上成熟的充填灌浆技术处理。考虑到实际渗漏通道的复杂性,在平面上,上排灌浆孔布置在上排桩轴线上,范围以计算出的渗漏通道位置为中心向两侧横向分别延伸 $25 \text{ m}$ ;在下排桩轴线上,以计算的渗漏通道为中心向左延至2号孔,向右延伸 $15 \text{ m}$ ,充填灌浆深度 $63 \sim 74 \text{ m}$ ;在以上范围内,灌浆孔排距 $3 \text{ m}$ ,孔距 $2 \text{ m}$ ,共 $154$ 个灌浆孔。在灌浆竣工 $1 \sim 2$ 个月后灰坝放灰运行,漏水点没有出现渗水现象,进行钻孔注水试验,测试渗透系数 $k = 4.5 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s}$ ,防渗效果明显。

## 5 结论

a. 渗漏土坝测井温度变化曲线及温度场是地下水渗流和渗漏状况综合信息的反映,结合水源、漏水点及排水点等其他温度信息,利用(下转第74页)

式中:  $Q_1$  为绕坝渗漏量,  $m^3/d$ ;  $B$  为库岸可能漏水段长度(从坝轴线算起),  $m$ ;  $r_0$  为坝肩与岩石接触面处绕坝渗漏流线圆轴迹半径, 取  $10\text{ m}$ ;  $K$  为渗透系数,  $m/d$ ;  $h_1, h_2$  分别为坝上、下游水头,  $m$ ;  $H$  为大坝上、下游水位差,  $m$ .

根据卡明斯基公式, 初步估算坝基渗漏量  $Q_2$ :

$$Q_2 = \frac{KCHT}{L + T}$$

式中:  $C$  为计算坝段长度,  $m$ ;  $L$  为坝底宽度,  $m$ ;  $T$  为隔水层的厚度,  $m$ .

根据坝址压水实验, 取钻孔压水透水率最大值为  $14\text{ Lu}$ , 计算渗透系数  $K$ :

$$K = 0.525w_lg \frac{0.66l}{r}$$

式中:  $l$  为压水段长度,  $l = 5\text{ m}$ ;  $r$  为钻孔半径,  $r = 37.5\text{ mm}$ ;  $w_l$  为压水透水率,  $\text{Lu}$ .

估算渗漏量  $Q = Q_1 + Q_2$ , 即绕坝渗漏量和坝基渗漏量之和, 再根据岩溶规律及岩溶渗漏通道的水力联系分析, 并考虑到水库的经济效益和具体的工程地质条件, 当坝高为  $70\text{ m}$ (水库的高程  $460\text{ m}$ ) 时不会造

成向库外渗漏的大的岩溶通道, 此时渗漏率是  $5.4\%$ , 属于中等渗漏. 如再进行适当的防渗处理, 渗漏率会更低, 水库的经济效益将会比较显著<sup>[3]</sup>.

## 6 结 论

在岩溶地区修建水库是可能的, 关键是要从库区的工程地质条件出发, 分析岩溶通道之间的水力联系以及分水岭的分布情况, 确定相对隔水层, 得到库区岩溶的发育和分布规律<sup>[4]</sup>, 从科学方法上因地制宜地论证成库的可行性, 供相关水库工程参考.

### 参考文献:

- [1] 余宏明, 朱志明, 李峰, 等. 湖北省五峰自治县麒麟观水库勘察报告[R]. 武汉: 中国地质大学工程学院, 2002.
- [2] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993. 302—317.
- [3] 李彦军. 岩溶地质综合勘察方法[J]. 铁道建筑, 2000(5): 8—9.
- [4] 李峰. 综合勘探在麒麟观水库岩溶勘察中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(5): 46—47.

(收稿日期 2004-09-16 编辑 骆超)

(上接第 71 页) 虚拟热源法模型, 建立温度场和渗流之间的联系, 可以判断渗漏状况, 计算渗漏参数. 由于工程实际的复杂性, 虚拟热源法理论上也有待于进一步完善.

b. 土坝电导值分布特征一定程度上也能够反映地下水的来源和渗漏特征, 是指示渗漏状况的间接标志. 由于影响渗漏和渗流电导值的因素众多而复杂, 电导在预测渗漏方面往往存在偏差, 还需要通过有关背景数据进行修正.

c. 综合温度和电导数据, 能有效显示土坝内部地下水渗漏路径、渗漏范围和大小, 为有效治理堤坝渗漏提供科学依据和施工建议.

本文应用表明, 利用温度和电导等天然形成的物理场进行渗漏示踪, 能准确、简便、环保和高效地探测土坝的渗漏破坏, 具有较好的应用前景. 考虑对流换热、各向异性三维空间问题及含水土体传热性质的实验研究是建立完善的虚拟热源法模型的基础, 也是今后需进一步研究的方向.

### 参考文献:

- [1] 刘建刚, 陈建生. 基岩渗漏成因病险堤坝的两个典型实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 28(4): 683—688.
- [2] 刘建刚, 陈建生, 陈亮. 综合示踪方法探测复杂堤基渗流[J]. 地质与勘探, 2002, 38(2): 94—96.
- [3] 杨松堂, 陈建生. 小浪底坝肩绕坝渗漏的综合示踪研究

[J]. 西部探矿工程, 2003, 8(7): 1—3.

- [4] 刘建刚, 陈建生. 平面热源法在北江石角段堤基渗漏分析中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2002, 33(3): 63—65.
- [5] 陈建生, 余波, 陈亮. 利用地下水温度场研究江都高水河船厂段堤防的渗漏[J]. 岩土工程界, 2003, 5(12): 37—39.
- [6] 陈建生, 董海洲, 余波, 等. 利用线热源法研究堤防集中渗漏通道[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 400—403.
- [7] 张洪济. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992. 283—336.
- [8] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of heat in solids[M]. 2nd Ed. Oxford: Clarendon Press, 1986. 254—308.
- [9] Shemin Ge. Estimation of groundwater velocity in localized fracture zones from well temperature profiles[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1998, 84: 93—101.
- [10] Beckera M W, Georgianb T, Ambrosea H. Estimating flow and flux of ground water discharge using water temperature and velocity[J]. Journal of Hydrology, 2004, 296: 221—233.
- [11] 董海洲. 堤坝渗漏热源法及示踪理论研究[D]. 南京: 淮海大学, 2004.

(收稿日期 2005-03-01 编辑: 马敏峰)

